动 物 学 研 究 2013，Jun. 34(3): 166−173 CN 53-1040/Q ISSN 0254-5853
Zoological Research DOI:10.11813/j.issn.0254-5853.2013.3.0166

莫莫格自然保护区白鹤秋季迁徙停歇期觅食生境选择

孔维尧[1]，郑振河[1]，吴景才[1]，宁 宇[2]，王 永[3]，韩晓东[1,*]

1. 吉林省林业科学研究院 湿地野生动物研究所，长春 130033；
2. 北京林业大学 生物科学与技术学院，北京 100083；
3. 莫莫格保护区 自然管理局，镇赉 137316

摘要：2008 年秋季(10 月 8 日—20 日)及 2009 年秋季(9 月 20 日—10 月 16 日)，通过样方法对觅食生境 11 个生态因子进行调查，利用卡方检验、资源选择指数和资源选择函数在莫莫格保护区对秋季迁徙停歇期白鹤觅食生境选择进行研究。结果表明，白鹤对距人为干扰源距离、植被密度、盖度、高度、植物性食物密度以及水深均具有选择性，但对宏观尺度干扰因子的选择性较低。其偏好觅食生境的特点为：距一级路>5000 m，>二级路 1500 m 以上，>三级路 1000 m 以上，>居民点 1000 m 以上，农田>1000 m；植被密度 20~50 株/m^2，盖度<10%，高度<20 cm，扁杆藨草密度 1~50 株/m^2，藨草密度 1~10 株/m^2，水深 40~60 cm。白鹤秋季觅食生境资源选择函数为 Logistic (P)=0.663+0.565×与一级道路距离+0.042×与二级道路距离+0.519×与三级道路距离+0.353×与居民点距离+0.169×与农田距离–0.455×植被密度–0.618×植被盖度–0.548×植被高度–0.158×扁杆藨草密度–0.404×藨草密度+0.920×水深，$T(x)=e^{\mathrm{Logistic}(p)}/[1+e^{\mathrm{Logistic}(p)}]$，模型正确预测率为 82.9%。

关键词：白鹤；觅食生境选择；资源选择指数；资源选择函数
中图分类号：Q959.7+26 **文献标志码**：A **文章编号**：0254-5853-(2013)03-0166-08

Foraging habitat selection of Siberian Crane (*Grus leucogeranus*) during autumn migration period in the Momoge Nature Reserve

Wei-Yao KONG[1], Zhen-He ZHENG[1], Jin-Cai WU[1], Yu NING[2], Yong WANG[3], Xiao-Dong HAN[1,*]

1. *Wetland and Wildlife Institute*, *Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences*, *Changchun* 130033, *China*;
2. *College of Biological Sciences and Biotechnology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*;
3. *Momoge Nature Reserve Bureau*, *Zhenlai* 137316, *China*

Abstract: In autumn of 2008 and 2009, we studied the foraging habitat selection of Siberian Crane (*Grus leucogeranus*) in the Momoge Nature Reserve of Jilin province. Using the resource selection index, resource selection functions, and the chi-squared test, we found that the Siberian Crane exhibited selectivity in their preferred foraging environments in relation to the distance to human disturbances, vegetation density, coverage and height, foraging vegetation density and water level. Interestingly, this selectivity in regards to large scale disturbances was lower than other factors. The characteristics of favorite foraging habits of Siberian Cranes include a variety of factors: a distance >5000 m from a national highway, >1500 m from a non-gravel road, >1000 m from the nearest road, >1000 m from a residential area, >1000 m from farmland; plant density between 20 and 50 grass/m^2; plant coverage lower than 10%; plant height lower than 20 cm; *Scirpus planiclmis* density between 1 and 50 grass/m^2; *Scirpus triqueter* density between 1 and 10 grass/m^2; and the water level between 40 and 60 cm. The resource selection functions of Siberian Crane foraging habitat in autumn can be described thusly: Logistic (P) = 0.663 + 0.565×distance to national highway + 0.042×distance to non-gravel road + 0.519×distance to the nearest road + 0.353×distance to residential area + 0.169×distance to farmland – 0.455×vegetation density – 0.618×vegetation coverage – 0.548×vegetation height – 0.158×*Scirpus planiclmis* density – 0.404×*Scirpus triqueter* density + 0.920×water level，$T(x)=e^{\mathrm{Logistic}(p)} / [1 + e^{\mathrm{Logistic}(p)}]$, with an overall prediction accuracy of 82.9%.

Keywords: Siberian Crane (*Grus leucogeranus*); Foraging habitat selection; Resource selection index; Resource selection functions

收稿日期：2012-11-21；接受日期：2013-02-04
基金项目：“十一五”林业科技支撑项目 (2006BAD03A1901)
*通信作者(Corresponding author)，E-mail: xdhan934@126.com
第一作者简介：孔维尧，男，31 岁，主要从事野生动物生态学研究。E-mail：kongweiyao@163.com

白鹤被 IUCN 物种红皮书列为“极危”，其在中国越冬的东部种群数量占全球种群数量的~99%，对于物种安全具有至关重要的意义。东部种群春季由越冬地经松嫩平原的向海、莫莫格及扎龙等地迁徙至西伯利亚东北部繁殖，秋季携幼鸟途径上述区域返回鄱阳湖越冬(He et al，2002)。莫莫格是白鹤重要迁徙停歇地，自 2004 年以来白鹤停歇数量始终维持在>2000 只。

动物对生境的适应和选择一直是动物生态学研究的热点 (Wei et al，1998)。生境选择既是行为生态学研究的重要内容, 也是野生动物，特别是濒危物种保护和管理必须研究的重要内容 (Han et al，2004)。生境选择研究方法一般可以分为两大类，即比较被利用—未利用生境以及比较被利用—可获得生境 (Bryan et al，1993；Jones，2001；Li et al，2008a,b)。被利用生境是指被动物所占据或使用的生境，未被利用生境是指未被动物所占据或使用的生境，可利用生境是指能够为动物所到达并予以利用的生境，包括被利用的生境。基于资源可获得性的生境选择研究可以更好地反映物种对生境的利用 (Aebiseher et al，1993；Hails et al，1996；Yang et al，2006；Li et al，2008b)，目前基于生境可获得性的方法对白鹤生境选择的研究以及对不同生境因子在白鹤觅食地选择过程中重要性的评估尚未见报道。资源选择函数由于可以将生境利用表现为若干因子的多元回归模型 (Boyce & McDonald，1999；Boyce et al，2002)，在近年的研究中得到越来越多的应用。多元回归模型对于样本量和样本独立性都有很高的要求 (Zhang & Yan，2004)，研究中常见的处理方法是对生境因子进行相关性分析后筛选 (Li et al，2008b；Liu et al，2009)，而因子取舍的合理性在很大程度上依赖研究者的判断。

本研究采用资源选择指数研究了秋季迁徙停歇在莫莫格自然保护区的白鹤对觅食生境的偏好，并结合主成分分析，建立资源选择函数，确定影响白鹤觅食生境选择的主要因子，以期为这一濒危物种的保护和管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域

研究区域位于莫莫格保护区鹅头泡(E123°38′~ 123°47′, N45°53′~45°57′)，面积~60 km^2。该区域原为芦苇沼泽，自 1998 年后水位持续下降，植被类型也发生了旱生化演替。2004 年后，保护区附近水田面积增加，每年秋季都有稻田退水通过前杭乃排灌站排入鹅头泡附近，植被也出现湿生化演替，形成以藨草 (*Scirpus triqueter*)、水稗 (*Echinochloa phyllopogon*)以及扁杆藨草 (*Scirpus planiclmis*)为建群种的植被群落，其他伴生种还包括狭叶香蒲 (*Typha angustifolia*)、水葱 (*Schoenoplectus tabernaemontani*)、芦苇 (*Phragmites communis*)、小叶樟 (*Deyeuxia angustifolia*)、碱蓬 (*Suaeda glauca*)及酸模叶蓼 (*Polygonum thunbergii*)等。

莫莫格保护区是白鹤重要停歇地 (Kanai et al，2002)。自 2006 年起，保护区迁徙停歇白鹤的数量猛增，2008 年记录到世界上最大的白鹤种群，数量>2700 只，占全球种群～2/3，特别是 2008 年后，白鹤停歇点由三门王家、后各力吐、古鲁台及白音套海等多个 (He et al，2002)变为一个，均位于研究区内。2008 年白鹤最早于 9 月 3 日迁徙至研究地，最晚于 11 月 7 日迁离，迁徙停歇期全长 55 d；2009 年 9 月 30 日首见，11 月 3 日迁离，停歇期 35 d。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置

使用 30~60× 单筒望远镜观察白鹤行为，一人固定视野，另一人通过对讲机步行至白鹤取食地点，在觅食地设置 1 m×1 m 样方，共设置取食地样方 90 个，样方间距>20 m。采用系统抽样法，每隔 1 km 设置一条样线，每条样线上间隔 100 m 设置一个 1 m×1 m 样方作为整体样方，样线覆盖整个研究区。通过观察，白鹤在无地表水及水深>60 cm 的区域无采食行为，因此，取样范围设置在水深 1~60 cm 的生境中，共取得整体样方 94 个，其中 28 个为觅食样方。

1.2.2 生态因子的测量

记录每个样方中的植被密度、高度、盖度及水深等参数。观察发现扁杆藨草与藨草为白鹤所取食，因此，这两种植物的密度也作为生态因子而被测量。选取 2008 年 9 月资源 2 号卫星拍摄的卫片(精度 5 m)，在 Mapinfo 7.0 界面进行矢量化，与研究区道路工程图叠加，测量样方与人为干扰源的距离。各种生态因子的定义和测量方法如下：与一级道路距离 (*X*1)为样方与最近的县级以上道路的直线距离；与二级道路距离 (*X*2)为样方与最近的非砂石道路的直线距离，在研究区域内，二级道路均为

村村通；与三级道路距离 ($X3$)为样方与最近道路的直线距离，在本研究中大部分为供农用车、行人及牲畜等行走的砂石道路；与居民点距离($X4$)为样方与最近居民点间的直线距离；与农田距离($X5$)为样方与最近农田间的直线距离；植被密度($X6$)为样方内所有植株的总数量(株/m^2)；植被盖度($X7$)为样方内所有植株的总盖度，以百分数表示；植被高度($X8$)为样方内最高植株的高度(cm)；

扁杆藨草密度($X9$)为样方内扁杆藨草的数量(株/m^2)；藨草密度($X10$)为样方内藨草的数量(株/m^2)；水深($X11$)为样方中心点水深(cm)。

1.2.3 数据处理

利用 Person 卡方检验分析动物对资源的利用是否存在选择性 (Shen et al, 2009)，并使用 Vanderploeg 和 Scavia 资源选择指数计算物种对生境的偏好 (Vanderploeg & Scavia, 1979)，计算公式为:

$$Ei = (Wi - 1/n) / (Wi + 1/n)$$

$$Wi = \Phi i / \sum_{i=1}^{n} \Phi i$$

$$\Phi i = Pi / Ai$$

其中 Pi 为物种利用资源 i 概率，Ai 为资源 i 占整体资源的比率，n 为资源 i 划分的等级数量。Ei 介于 −1~1，取值为正数时表示对该种资源为正选择，为负数时表示负选择，取值越大表明物种对该资源的喜好程度越高，反之亦然，取值为 0 时表示中性选择。

对生态因子进行标准化以消除不同统计量纲间的差异 (Li et al，2001)，对标准化后的生态因子进行主成分分析，计算每个生态因子的因子负荷与因子得分，并根据因子得分计算压缩后各主成分的 Z 值，计算方法为：

$$Zm = \sum_{r=1}^{N} Xr * \theta mr$$

其中 Zm 为压缩后第 m 个主成分的值，N 为生态因子的个数，Xr 为第 r 个生态因子标准化后的值，θmr 为第 r 个生态因子在第 m 个主成分中的因子得分。使用 Binary Logistic 回归中的向前法 (forward method)，以压缩后的因子为变量，建立白鹤觅食生境资源选择函数模型，采用条件检验(conditional)剔除未能进入方程的变量。模型建立后，将压缩后变量的选择系数还原为原始变量的选择系数，计算方法为：

$$Bxr = \sum_{m=1}^{N'} Bzm * \theta mr$$

其中 Bxr 为变量还原后第 r 个生态因子在回归方程中的选择系数，Bzm 为压缩后第 m 个主成分的选择系数，N'为进入回归方程的压缩变量的数量。

数据标准化、卡方检验、因子分析以及 Logistic 回归等均使用 SPSS 11.0 进行运算。

2 结 果

2.1 秋季迁徙停歇期白鹤觅食生境的选择

白鹤对于秋季觅食生境 11 个生态因子均具选择性(表 1)，除距离一级道路(P=0.030)、二级道路距离(P=0.035)外，卡方检验结果均极为显著。秋季白鹤偏好生境特征为：与一级路、二级路、三级路、居民点及农田的距离分别>5000、1500、1000、1000 及 1000 m；植被密度 20~50 株/m^2，盖度<10%，高度<20 cm，扁杆藨草密度 1~50 株/m^2，藨草密度 1~10 株/m^2；水深 40~60 cm。

2.2 生态因子主成分分析。

对样方中生态因子标准化并进行主成分分析，前 6 个因子累计贡献率达到 87.4%。11 个生态因子的因子负荷及因子得分见表 2。第一主成分贡献率为 32.8%，其中负荷较大的因子反映农业生产生活及植被特征信息，包括与居民点及农田间的距离 (−0.718、−0.611)、植被密度 (0.812)、盖度 (0.863)、高度(0.687)以及藨草密度(0.555)等；第二主成分贡献率为 16.0%，其中负荷较大的因子反映立地尺度人为干扰以及植被密度信息，包括与三级路及农田间的距离 (0.686、0.603)、植被密度 (0.433)以及藨草密度 (0.432)等；第三主成分贡献率为 15.5%，负荷较大的因子包括与一级路间的距离(0.619)、扁杆藨草密度(0.421)及水深(0.418)；第四主成分贡献率为 9.4%，负荷较大的因子为与一级道路及三级道路间的距离 (0.372、0.362)、植被高度 (0.431)以及扁杆藨草密度 (−0.644)等；第五主成分贡献率为 9.0%，负荷较大的因子为藨草密度 (−0.523)及水深 (−0.618)；第六主成分贡献率为 4.6%，负荷较大的因子包括与一级以及二级道路间的距离(−0.275、0.377)、植被高度 (0.268)及水深 (−0.286)。

2.3 白鹤秋季觅食生境资源选择函数

物种对生境的选择是多种生态因子共同作用的结果，所以资源选择函数一般表现为一个包括多个独立生境变量的线性对数模型: ω(x)=exp (β0+

表 1　白鹤对觅食生境生态因子的选择

Table 1　Selection of foraging habitat factors by Siberian Crane

	i 类型 Types	*Pi* 使用概率 Used proportion	*Ai* 期望概率 Expected proportion	*Φi* *Pi* / *Ai*	*Wi* 资源选择系数 Selection coefficient	*Ei* 资源选择指数 Selection index
*X*1 Distance to national highway （m）	<3000	0.478	0.415	1.152	0.250	0.000
	3000~4000	0.144	0.255	0.566	0.123	−0.341
	4000~5000	0.278	0.277	1.004	0.218	−0.068
	≥5000	0.100	0.053	1.880	0.409	0.241
			K^2=8.920 *df*=3 Sig=0.030			
*X*2 Distance to non-gravel road（m）	<1000	0.278	0.277	1.004	0.217	−0.070
	1000~1500	0.267	0.383	0.696	0.151	−0.248
	1500~2000	0.167	0.096	1.741	0.377	0.202
	≥2000	0.289	0.245	1.181	0.255	0.011
			K^2=8.578 *df*=3 Sig=0.035			
*X*3 Distance to the nearest road（m）	<400	0.111	0.234	0.475	0.073	−0.466
	400~600	0.289	0.213	1.358	0.208	0.020
	600~800	0.344	0.319	1.079	0.165	−0.095
	800~1000	0.167	0.202	0.825	0.126	−0.225
	≥1000	0.089	0.032	2.786	0.427	0.362
			K^2=18.083 df=4 Sig=0.001			
*X*4 Distance to residential area （m）	<600	0.044	0.202	0.220	0.035	−0.704
	600~800	0.178	0.309	0.576	0.091	−0.375
	800~1000	0.100	0.223	0.448	0.071	−0.478
	1000~1200	0.189	0.074	2.537	0.401	0.334
	≥1200	0.489	0.191	2.553	0.403	0.337
			K^2=79.968 *df*=4 Sig=0.000			
*X*5 Distance to farmland （m）	<400	0.1667	0.223	0.746	0.113	−0.278
	400~600	0.2000	0.330	0.606	0.092	−0.370
	600~800	0.2000	0.213	0.940	0.142	−0.168
	800~1000	0.1556	0.149	1.044	0.158	−0.117
	≥1000	0.2778	0.085	3.264	0.494	0.424
			K^2=46.204 *df*=4 Sig=0.000			
*X*6 Vegetation density (grass/m^2)	< 20	0.3889	0.319	1.219	0.273	0.044
	20~50	0.4222	0.170	2.480	0.555	0.379
	50~100	0.1000	0.213	0.470	0.105	−0.408
	100~150	0.0889	0.298	0.298	0.067	−0.578
			K^2=53.659 *df*=3 Sig=0.000			
*X*7 Vegetation coverage （%）	<10	0.467	0.191	2.437	0.509	0.436
	10~30	0.200	0.191	1.044	0.218	0.043
	30~60	0.256	0.298	0.858	0.179	−0.055
	60~80	0.067	0.181	0.369	0.077	−0.444
	≥80	0.011	0.138	0.080	0.017	−0.845
			K^2=53.337 *df*=4 Sig=0.000			
*X*8 Vegetation Height （cm）	<20	0.611	0.287	2.128	0.608	0.417
	20~40	0.289	0.340	0.849	0.243	−0.015
	40~60	0.067	0.213	0.313	0.090	−0.472
	≥60	0.033	0.160	0.209	0.060	−0.615
			K^2=51.706 df=3 Sig=0.000			
X9 Density of *Scirpus planiclmis* (grass/m^2)	0	0.300	0.426	0.705	0.182	−0.158
	1~20	0.422	0.266	1.587	0.409	0.241
	20~50	0.256	0.181	1.413	0.364	0.186
	≥50	0.022	0.128	0.174	0.045	−0.696
			K^2=30.267 *df*=3 Sig=0.000			
*X*10 Density of *Scirpus triqueter* (grass/m^2)	0	0.578	0.660	0.876	0.149	−0.148
	1~10	0.256	0.085	3.003	0.509	0.436
	10~20	0.111	0.085	1.305	0.221	0.051
	20~40	0.044	0.074	0.596	0.101	−0.328
	≥40	0.011	0.096	0.116	0.020	−0.821
			K^2=40.262 *df*=4 Sig=0.000			
*X*11 Water level （cm）	<10	0.011	0.106	0.104	0.018	−0.831
	10~20	0.078	0.234	0.332	0.059	−0.545
	20~30	0.167	0.213	0.783	0.139	−0.180
	30~40	0.300	0.319	0.940	0.167	−0.091
	≥40	0.444	0.128	3.481	0.617	0.510
			K^2=88.220 *df*=4 Sig=0.000			

表 2 样方生态因子主成分分析

Table 2 Principal component analysis of ecology factors

	1		2		3		4		5		6	
	因子负荷 Factor loading	因子得分 Factor score	因子负荷 Factor loading	因子得分 Factor score	因子负荷 Factor loading	因子得分 Factor score	因子负荷 Factor loading	因子得分 Factor score	因子负荷 Factor loading	因子得分 Factor score	因子负荷 Factor loading	因子得分 Factor score
*X*1 Distance to national highway（m）	0.387	0.107	−0.213	−0.121	0.619	0.362	0.372	0.358	0.347	0.349	−0.275	−0.540
*X*2 Distance to non-gravel road（m）	−0.080	−0.022	−0.073	−0.042	0.890	0.521	−0.068	−0.066	0.051	0.052	0.377	0.741
*X*3 Distance to the nearest road （m）	−0.332	−0.092	0.686	0.390	0.069	−0.040	0.362	0.349	0.420	0.422	−0.138	−0.271
*X*4 Distance to residential area（m）	−0.718	−0.199	0.470	0.267	0.302	0.177	0.077	0.074	0.072	0.072	0.260	0.511
*X*5 Distance to farmland （m）	−0.611	−0.169	0.603	0.343	−0.208	−0.122	−0.206	−0.199	0.059	0.060	−0.011	−0.021
*X*6 Plant density (grass/m^2)	0.812	0.225	0.433	0.246	0.081	0.048	−0.054	−0.052	0.077	0.077	−0.031	−0.061
*X*7 Plant coverage （%）	0.863	0.239	0.289	0.164	−0.084	−0.049	0.017	0.017	0.132	0.133	0.054	0.106
*X*8 Plant Height（cm）	0.687	0.190	0.185	0.105	−0.166	−0.097	0.431	0.416	−0.060	−0.061	0.268	0.527
*X*9 Density of Scirpus planiclmis (grass/m^2)	0.370	0.102	0.335	0.190	0.421	0.246	−0.644	−0.621	0.068	0.069	−0.207	−0.406
*X*10 Density of Scirpus triqueter (grass/m^2)	0.555	0.154	0.432	0.245	0.032	0.019	−0.013	−0.012	−0.523	−0.526	0.067	0.132
*X*11 Water level（cm）	−0.367	−0.102	0.222	0.126	0.418	0.245	0.332	0.320	−0.618	−0.621	−0.286	−0.562

β1*x*1+β2*x*2+…+βk*x*k)。其中 *x* 代表不同的独立生境变量，β 表示选择系数。物种对觅食生境的选择表现为 0，1 的二元变量，觅食生境取值为 1，非觅食生境取值为 0，因此，采用 Logistic 回归模型 $T(x)=\omega(x)/[1+\omega(x)]$ 建立白鹤秋季觅食生境资源选择函数。根据主成分分析因子得分，将原始因子压缩为 6 个主成分，z1～z6。使用向前法进行二元 Logistic 回归，并采用条件检验剔除未能进入方程的变量。进入方程的变量依次为 z1、z3、z6 及 z4，而 z2、z5 未能进入方程。计算最终结果见表 3。

表 3 白鹤觅食生境选择函数中压缩后生态因子选择系数

Table 3 Selection coefficients in foraging habitat selection function of White cranes after data reduction

主成分 Component	B Coefficient	Wald 检验值 Wald Chi-square	显著性 Sig
z1	−2.213	36.322	0.000
z3	0.834	7.942	0.005
z4	0.577	4.699	0.030
z6	−0.544	4.896	0.027
常数 Constant	0.663	6.846	0.009

白鹤觅食生境选择模型为：$\text{Logistic}(P) = 0.663-2.213z_1+0.834z_3+0.577z_4-0.544z_6$，$T(x)=e^{\text{Logistic}(p)}/[1+e^{\text{Logistic}(p)}]$，*P* 为白鹤选择该生境进行觅食的概率，模型整体正确预测率为 82.9%，其中觅食样方正确预测率为 85.6%，非觅食样方正确预测率为 79%。根据各变量的因子负荷将压缩后的变量还原，如 *x*1 还原方法为：−2.213×0.107+0.834×0.362+0.577×0.358+(−0.544)×(−0.54)=0.565。变量还原后各生态因子在方程中的回归系数见表 4。按照原始变量建立的白鹤觅食生境选择模型为 Logistic (*P*)=0.663+0.565*X*1+0.042*X*2+0.519*X*3+0.353*X*4+0.169*X*5–0.455*X*6–0.618*X*7–0.548*X*8–0.158*X*9–0.404*X*10+0.920*X*11，$T(x)=e^{\text{Logistic}(p)}/[1+e^{\text{Logistic}(p)}]$。

表 4 还原后 11 个生态因子的选择系数

Table 4 Selection coefficients of the 11 original factors

因子 Original Factor	还原后的选择系数 Selection coeffcients in the function after data reversion
*X*1 Distance to national highway (m)	0.565
*X*2 Distance to non-gravel road (m)	0.042
*X*3 Distance to the nearest road (m)	0.519
*X*4 Distance to residential area (m)	0.353
*X*5 Distance to farmland (m)	0.169
*X*6 Plant density (grass/m^2)	−0.455
*X*7 Plant coverage (%)	−0.618
*X*8 Plant Height (cm)	−0.548
*X*9 Density of *Scirpus planiclmis* (grass/m^2)	−0.158
*X*10 Density of *Scirpus triqueter* (grass/m^2)	−0.404
*X*11 Water level (cm)	0.920

3 讨　论

资源选择系数可就动物对同一生态因子不同等级的选择性进行比较和排序，以确定动物对栖息地因素类别选择的先后顺序，并更好地描述物种使用栖息地资源的偏好，尤其适于多资源的栖息地选择研究 (Han et al，2004)，但由于该方法将所有生态因子同等看待，因而不能反映各因子的主次作用 (Yang，2006)。本研究在 Vanderploeg 和 Scavia 资源选择指数的基础上进行卡方检验，以分析白鹤对觅食生境不同生态因子选择的强度。

结果表明，虽然白鹤对各种人类干扰源均表现回避，但对立地尺度干扰源 (距离三级道路距离：K^2=18.083，*df*=4，Sig=0.001；距居民点距离：K^2=79.968，*df*=4，Sig=0.000；距农田距离：K^2=46.204，*df*=4，Sig=0.000)的选择强度明显高于宏观尺度干扰源 (距一级路距离：K^2=8.920，*df*=3，Sig=0.030；距二级路距离：K^2=8.578，*df*=3，Sig=0.035)。一级道路及二级道路产生的干扰强度强于三级道路，但受尺度影响，白鹤对距三级道路距离反而表现更强的选择性。

白鹤对于食物因子 (扁杆藨草密度：K^2=30.267，*df*=3，Sig=0.000；藨草密度：K^2=40.262，*df*=4，Sig=0.000)虽然表现较强选择性，但选择强度不及水深 (K^2=88.220，*df*=4，Sig=0.000)和距居民点距离(K^2=79.968，*df*=4，Sig=0.000)，符合资源–防护原则 (asset-protection principle)(Clark，1994；Olsson et al，2002)，即当食物由于高丰富度而产生较小的价值时，采食者的注意力将从取食转向减少风险。在进行觅食行为观察时发现，白鹤主要取食藨草及扁杆藨草的球茎，藨草根部的球茎比扁杆藨草更柔软，淀粉含量也更高，但并非所有的藨草均长有球茎，在调查过程中出现的频率很低，远不能满足迁徙期大量白鹤取食的需要。据此可以推断，白鹤在迁徙季节主要以扁杆藨草的球茎作为食物。在研究区内，扁杆藨草丰富度较高，白鹤的注意力转向远离人为干扰、水深较深且人与牲畜难以进入的环境。白鹤对植被密度的选择强度(K^2=53.659，*df*=3，Sig=0.000)也高于食物因子。根据资源选择指数，白鹤偏好植被密度较小且扁杆藨草密度偏低的生境。因为白鹤主要以掘食方式进食，过高的植被密度会增加能量消耗，根据最优采食理论 (Pulliam，1976)，选择植被密度较低的生境虽然降低了食物丰富度，但节省了采食时的能量消耗，可以使单位时间内的能量收入最大化。

根据资源选择指数，白鹤偏好水深较深 (40~60 cm)的生境，这与 Jiang et al (2007)在图牧吉的研究结果类似，但与以往研究相比水位更深 (He et al，2002；Jiang et al，2007；Wang et al，2009)。水文对于湿地鸟类的影响可以是直接或间接的 (Osiejuk et al,1999)。例如，水位会对湿地空间结构、植被类型、食物的可得性以及栖息地的微生境产生影响 (Sanders，1999)。白鹤偏好水深较深的环境主要有三方面原因：人与家畜难以进入较深的水深区域，干扰强度小；深水区土壤浸泡得更松软，白鹤在取食植物根茎时能量消耗更小；深水区域有利于形成植物密度较低的环境，而这样的环境同样也是白鹤偏好的。另外，研究发现集群白鹤觅食地的水深较家庭群及零散个体觅食地更深，这与 He et al (2002)的研究结果相同。2008—2009 年，莫莫格秋季白鹤集群数量远多于以往研究中的数量，选择水深更深的生境也是集群白鹤回避采食风险的一种策略。实际上，扁杆藨草生长期的最佳水深为 20~30 cm，当水深>30 cm 时，其密度开始降低；在水深>40 cm 的区域，则完全消失。由于稻田泄水时间是 9 月末，植物生长已经结束，受泄水影响，形成白鹤偏好植被特点的生境水深增加。

由于动物对生境的选择通常受食物、隐蔽性和水源条件等多种因素的制约，因此，资源选择函数通常表现为一个包括多个独立生境变量的线性对数模型 (Han et al，2004)。多元回归模型对于样本量和样本独立性都有很高的要求 (Zhang & Yan，2004)，研究中常见的处理方法是对生境因子进行相关性分析，对相关性较大的因子进行筛选以消除共线性 (Han et al，2004；Li et al，2008；Liu et al，2009)。在进行因子筛选时，不仅要考虑统计学意义，还要兼顾生物学意义 (McGrath et al，2003；Jia et al，2005)，这就对研究者的经验和判断能力提出了一定的要求，特别是当有显著生态学意义的因子相关性较高时 (Li et al，2001)，因子的取舍变得更加困难。应用主成分分析不仅可以压缩变量，提高回归模型的准确度 (Zhang & Yan，2004)，并且回避了因子筛选问题。从选择系数来看，对白鹤觅食生境选择影响较大的因子包括水深 (0.920)、与一级及三级道路间距离 (0.565，0.519)、植被密度(−0.455)、盖度(−0.618)、高度(−0.548)以及藨草密度(−0.404)等。根据卡方检验结果，除与一级道路及三级道路

距离外，白鹤对于以上因子的选择强度也是 11 个因子中较强的。虽然白鹤对与居民点(K^2=79.968，df=4)及农田距离的选择强度(K^2=46.204，df=4)高于与道路间的距离，但对前两个因子的选择只是偏好其中某一等级的资源 (如距农田 >1 000 m)，对于其他等级资源的选择并未呈现明显的相关关系。由于同样原因，白鹤对于扁杆藨草密度的选择强度也较大 (K^2=30.267，df=3)，但这种选择仅限于中低密度范围，因此，扁杆藨草密度在回归方程中的选择系数并不高(−0.227)。与一级及二级道路间距离的回归系数较高可能是两个因子与水深间的相关性所致。由于一般修建道路的地势较高，离道路越远，水深往往越深，这两个因子较高的回归系数并不能说明与道路间距离是影响白鹤觅食生境选择的主要因素。

在回归方程中，与道路、农田和居民点间的距离以及水深与白鹤觅食生境选择概率正相关，而植被密度、高度、盖度以及植物性食物的密度与选择概率负相关，这表明白鹤偏好距离干扰源较远、水深较深、植被密度较低且食物丰富度适中的觅食生境，这一结果与资源选择系数得到的结论一致。

致谢：感谢莫莫格保护区管理局对野外工作的大力支持，感谢吉林省测绘研究院孙永君先生在地理信息系统使用及空间数据处理过程中提供的无私协助。

参考文献：

Aebiseher NJ, Robertson PA, Kenward RE. 1993. Compositional analysis of habitat use from animal radio-tracking data. *Ecology*, **74**(5): 1313-1325.

Boyce MS, McDonald LL. 1999. Relating populations to habitats using resource selection functions. *Trends in Ecology and Evolution*, **14**(7): 268-272.

Boyce MS, Vernier PR, Nielsen SE, Schmiegelow FK. 2002. Evaluation resource selection functions. *Ecological Modeling*, **157**(2-3): 281-300.

Bryan FJM, McDonald L, Thomas DL. 1993. Resource Selection by Animals Statistical Design and Analysis for Field Studies. London: Chapman and Hall Press.

Clark CW. 1994. Antipredator behavior and the asset-protection principle. *Behavioral Ecology*, **5**(2): 159-170.

Hails Y, Nicholls AO, Hanski IK, Raivio S, Haila SR. 1996. Stochasticity in bird habitat selection: year- to-year changes in territory in a boreal forest birds assemblage. *Oikos*, **76**(3): 536-552.

Han ZX, Wei FW, Zhang ZJ, Li M, Zhang BW, Hu JC. 2004. Habitat selection by red pandas in Fengtongzhai Natural Reserve. *Acta Theriologica Sinica*, **24**(3): 185-192. [韩宗先, 魏辅文, 张泽钧, 李明, 张保卫, 胡锦矗. 2004. 蜂桶寨自然保护区小熊猫对生境的选择. 兽类学报, **24**(3): 185-192.]

He CG, Song YJ, Lang HQ, Li HK, Sun XW. 2002. Migratory dynamics of Siberian crane and environmental conditions at its stop-over site. *Biodiversity Science*, **10**(3): 286-290. [何春光, 宋榆钧, 郎惠卿, 李鸿凯, 孙孝维. 2002. 白鹤迁徙动态及其停歇地环境条件研究. 生物多样性, **10**(3): 286-290.]

Jia F, Wang H, Zheng GM. 2005. Habitat selection and spatial distribution of white eared-pheasant (*Crossoptilon crossoptilon*) during early breeding period. *Acta Zoologica Sinica*, **51**(3): 383-392. [贾非, 王楠, 郑光美. 2005. 白马鸡繁殖早期栖息地选择和空间分布. 动物学报, **51**(3): 383-392.]

Jiang WJ, Li MS, Du Y. 2007. Foraging habitat of *Grus leucogeranus* in spring in Tumuji Natural Reserve, Inner Mongolia. *Jilin Forestry Science and Technology*, **36**(3): 28-31, 35. [姜维军, 李梦莎, 杜宇. 2007. 内蒙古图牧吉春季白鹤觅食地生境初步研究. 吉林林业科技, **36**(3): 28-31, 35.]

Jones J. 2001. Habitat selection studies in avian ecology: A critical review. *Auk*, **118**(2): 557-562.

Kanai Y, Ueta M, Germogenov N, Nagendran M, Mita N, Higuchi H. 2002. Migration routes and important resting areas of Siberian cranes (*Grus leucogeranus*) between northeastern Siberia and China as revealed by satellite tracking. *Biological Conservation*, **106**(3): 339-346.

Li HQ, Lian ZM, Chen CG. 2008a. Using resource selection functions to study the roost-site selection by brown-eared pheasant in winter. *Sichuan Journal of Zoology*, **27**(6): 1082-1085. [李宏群, 廉振民, 陈存根. 2008a. 应用资源选择函数对褐马鸡冬季夜栖地选择的研究. 四川动物, **27**(6): 1082-1085.]

Li XH, Ma ZJ, Li DM, Ding CQ, Zhai TB, Lu BZ. 2001. Using resource selection functions to study nest site selection of Crested Ibis. *Biodiversity Science*, **9**(4): 352-358. [李欣海, 马志军, 李典谟, 丁长青, 翟天庆, 路宝忠. 2001. 应用资源选择函数研究朱鹮的巢址选择. 生物多样性, **9**(4): 352-358.]

Li YK, Zhang MH, Jiang ZG. 2008b. Habitat selection by wapiti (*Cervus elaphus xanthopygus*) in the Wandashan Mountains based on habitat availability. *Acta Ecologica Sinica*, **28**(10): 4619-4628. [李言阔, 张明海, 蒋志刚. 2008b. 基于生境可获得性的完达山地区马鹿 (*Cervus elaphus xanthopygus*) 冬季生境选择. 生态学报, **28**(10): 4619-4628.]

Liu ZS, Zhang MM, Li ZG, Ding CQ, Zhai TB, Lu BZ. 2009. Feeding and bedding habitat selection by red deer (*Cervus elaphus alxaicus*) during winter in the Helan Mountains, China. *Theriologica Sinica*, **29**(2): 133-141. [刘振生, 张明明, 李志刚, 胡天华, 翟昊. 2009. 贺兰山马鹿冬季取食和卧息生境选择. 兽类学报, **29**(2): 133-141.]

McGrath MT, DeStefand S, Riggs RA. 2003. Spatially explicit influences on northern goshawk nesting habitat in the interior Pacific Northwest. *Wildlife Monographs*, (154): 1-63.

Olsson O, Brown JS, Smith HG. 2002. Long and short-term state-dependent foraging under predation risk: all indication of habitat quality. *Animal Behaviour*, **63**(5): 981-989.

Osiejuk TS, Kuczynski L, Jermaczek A, Tryjanowski P. 1999. The effect of

water conditions on breeding communities of pastures, meadows and shrub habitats in the Slonsk reserve, NW Poland. *Biologia*, **54**(2): 207-214.

Pulliam HR. 1976. The principal of optimal behavior and theory of communities. *In*: Klopfer PH, Bateson PG. Perspective in Ecology. New York: Plenun Press, 311-332.

Sanders MD. 1999. Effect of changes in water level on numbers of black stilts (*Himantopus novaezelandiae*) using deltas of Lake Benmore. *New Zealand Journal of Zoology*, **26**(2): 155-163.

Shen DJ, Zheng HX, Wang Y, Ge L, Zheng GW, Huang YC, Li KJ, Tang L. 2009. Winter habitats of dwarf blue sheep (*Pseudois schaeferi*) and goral (*Naemorhedus goral*) in Batang County, Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, **29**(5): 2320-2330. [申定健, 郑合勋, 王淯, 格来, 曾国伟, 黄艺川, 李开俊, 唐伦. 2009. 四川省巴塘县矮岩羊与斑羚冬季生境比较. 生态学报, **29**(5): 2320-2330.]

Vanderploeg HA, Scavia D. 1979. Calculation and use of selectivity coefficients of feeding: zooplankton grazing. *Ecological Modeling*, **7**(2): 135-149.

Wang L, Zou HF, Li XM, Wu QM. 2009. Foraging habitat of Siberian Crane (*Grus leucogeranus*) in autumn in Tumuji nature reserve in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Wildlife*, **30**(1): 20-22. [王磊, 邹红菲, 李晓民, 吴庆明. 2009. 图牧吉自然保护区白鹤秋季觅食地生境初步研究. 野生动物, **30**(1): 20-22.]

Wei FW, Feng ZJ, Wang ZW. 1998. Review of the research of habitat selection in wildlife. *Chinese Journal of Zoology*, **33**(4): 48-52. [魏辅文, 冯祚建, 王祖望. 1998. 野生动物对生境选择的研究概况. 动物学杂志, **33**(4): 48-52.]

Yang CH, Zhang HM, Zhou XP, Wang YP, Wang XM. 2006. Review of habitat selection in the Giant Panda (*Ailuropoda melanoleuca*) . *Acta Ecologica Sinica*, **26**(10): 3442-3453. [杨春花, 张和民, 周小平, 王鹏彦, 王小明. 2006. 大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 生境选择研究进展. 生态学报, **26**(10): 3442-3453.]

Zhang WT, Yan J. 2004. Basic Statistical Analysis Tutorial for SPSS. Beijing: Higher Education Press. [张文彤, 阎洁. 2004. SPSS 统计分析基础教程. 北京: 高等教育出版社.]